

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 631 979**

51 Int. Cl.:

| | | | |
|--------------------|-----------|-------------------|-----------|
| B23K 26/26 | (2014.01) | B23K 35/30 | (2006.01) |
| C22C 38/08 | (2006.01) | B23K 15/00 | (2006.01) |
| C22C 38/14 | (2006.01) | | |
| C22C 38/16 | (2006.01) | | |
| F03D 1/00 | (2006.01) | | |
| B23K 101/06 | (2006.01) | | |
| B23K 101/18 | (2006.01) | | |
| B23K 103/04 | (2006.01) | | |
| B23K 26/211 | (2014.01) | | |
| B23K 15/06 | (2006.01) | | |

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.12.2010 PCT/JP2010/071721**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **09.06.2011 WO11068216**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.12.2010 E 10834666 (9)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.05.2017 EP 2508291**

54 Título: **Junta de soldadura a tope formada usando un haz de electrones**

30 Prioridad:

04.12.2009 JP 2009277035

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

07.09.2017

73 Titular/es:

**NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORPORATION (100.0%)
6-1, Marunouchi 2-chome, Chiyoda-ku
Tokyo 100-8071, JP**

72 Inventor/es:

**ISHIKAWA, TADASHI;
HONMA, RYUICHI y
ICHIKAWA, KAZUTOSHI**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 631 979 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Junta de soldadura a tope formada usando un haz de electrones

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a una junta de soldadura que se realiza mediante soldadura a tope al irradiar un par de materiales de acero con un haz de alta densidad energética y, más particularmente, a una junta de soldadura con excelentes propiedades de fatiga en un entorno de vibración en el rango de los gigaciclos.

Se reivindica prioridad de la Solicitud de patente japonesa N° 2009-277035, presentada el 4 de diciembre de 2009, cuyo contenido se incorpora a la presente a modo de referencia.

Técnica relacionada

10 En años recientes, con el fin de reducir el gas CO₂ que produce el calentamiento global, o bien para hacer frente al futuro agotamiento de los combustibles fósiles como el petróleo, se ha intentado activamente implementar métodos que emplean energías naturales renovables. La energía eólica es una de ellas, la cual se ha difundido mundialmente a gran escala. Las áreas más adecuadas para la energía eólica son aquellas en las que se prevé que sople un viento fuerte de manera constante; por esto se han planeado y realizado obras de energía eólica costa afuera a
15 escala global (véanse los documentos de patente 1 a 4).

Con el fin de construir una torre generadora de energía eólica en altamar, es necesario que parte de los cimientos de la torre se ancle al fondo del mar, y que dicha parte de los cimientos además tenga una longitud suficiente que iguale al menos la profundidad del agua en la cual se coloca parte de los cimientos. Además, como es necesario optimizar el período natural de toda la torre generadora de energía eólica dentro de un rango estrecho, se deberá
20 adoptar una estructura tubular con un espesor de placa de 50 mm o superior, por ejemplo, de alrededor de 100 mm, y con una amplia sección cuyo diámetro sea de aproximadamente 4 m en la parte de los cimientos de la torre generadora de energía eólica. Por lo tanto, la altura total de la torre será igual o superior a 80 m. Se requiere soldadura y montaje para dicha gran estructura en la orilla del mar, cerca de una obra de construcción, de forma sencilla y altamente eficiente.

25 Por lo tanto, tal como se describe más arriba, existe la necesidad de soldar una placa de acero extremadamente gruesa que tiene un espesor de placa que alcanza los 100 mm de forma altamente eficiente y en el lugar de la obra, lo cual no existe en la técnica relacionada.

En general, una soldadura con haces de alta densidad energética, tal como la soldadura con haz de electrones, una soldadura con haz láser, y similares, constituyen métodos de soldadura eficaces. No obstante, particularmente en la soldadura con haz de electrones, es necesario que la soldadura se realice manteniendo un estado de alto vacío en una cámara de vacío, por lo cual el tamaño de la placa de acero que puede soldarse se limita en la técnica
30 relacionada. En contraste, en los últimos años, como método de soldadura por el cual una placa de acero extremadamente gruesa que tiene un espesor de placa de aproximadamente 100 mm se puede soldar eficientemente en el lugar de la obra, en el Instituto Británico de Investigación en Soldadura se ha desarrollado un
35 método de soldadura (soldadura por haz de electrones con presión reducida o RPEBW, por sus siglas en inglés Reduced Pressure Electron Beam Welding) que posibilita la construcción a bajo vacío, y que será sugerido (véase el documento de patente 5).

Al adoptar el método RPEBW, se espera que la soldadura se pueda llevar a cabo eficientemente de modo tal que solo una sección a soldar se encuentre en un estado local de vacío, incluso al soldar una estructura de gran tamaño
40 como la torre generadora de energía eólica.

Sin embargo, por otro lado, en el método RPEBW surgen nuevos problemas, tales como la dificultad de asegurar la resistencia de una sección del metal fundido (en adelante, una "sección del metal de soldadura") que se suelda por medio de un haz de electrones y luego se solidifica de modo tal que la soldadura se lleve a cabo en un estado en el cual se disminuye el grado de vacío, en comparación con el método de soldadura en la cámara de vacío.

45 Para superar los problemas anteriormente descritos, en la técnica relacionada, se sugirió en los documentos de patente 6 y 7 un método en el cual se realiza una soldadura por haz de electrones uniendo un metal de inserción, como Ni en forma de placa, y similares, a uno de los extremos soldables, de modo tal que un contenido de Ni de un metal de soldadura sea de un 0,1 a 4,5 % en masa para así mejorar la resistencia, como por ejemplo un valor de impacto Charpy del metal de soldadura y similares.

50 La torre generadora de energía eólica en altamar está expuesta a la vibración producida por el constante soplar de fuertes vientos, tal como se describió anteriormente, por lo cual la estructura de la parte de los cimientos soporta una carga de forma continua y repetida, y se aplica tensión de forma continua y repetida sobre una sección soldada de la estructura. Por este motivo, la sección soldada de la estructura requiere propiedades resistentes a la fatiga ante la vibración en el rango de los gigaciclos (10^{9-10}), con un orden diferente al ciclo de fatiga habitual (10^{6-7}).

Documentos de referencia

Documentos de patente

[Documento de patente 1] Solicitud de patente japonesa sin examinar, primera publicación

[Documento de patente 2] Solicitud de patente japonesa sin examinar, primera publicación N° 2007-092406

5 [Documento de patente 3] Solicitud de patente japonesa sin examinar, primera publicación N° 2007-322400

[Documento de patente 4] Solicitud de patente japonesa sin examinar, primera publicación N° 2006-037397

[Documento de patente 5] Panfleto de WO 99/16101

[Documento de patente 6] Solicitud de patente japonesa sin examinar, primera publicación N° H3-248783

[Documento de patente 7] Panfleto de WO 08/041372

10 El documento JP-2001 071176 A divulga una junta de soldadura que comprende: un par de materiales de acero; y un metal de soldadura formado por un haz de alta densidad energética (en una sección de la soldadura a tope entre el par de materiales de acero, donde el contenido de C en el par de materiales de acero se encuentra en el rango de 0,01 a 0,08 % en masa, donde una temperatura de inicio de la transformación Ms, que se calcula mediante la siguiente fórmula (a) empleando una composición en % en masa del metal de soldadura, es de 250 °C o menos, y
15 donde se imparte una tensión residual de compresión en la sección de la soldadura a tope.

$Ms (°C) = 371 - 353C - 22Si - 24,3Mn - 7,7Cu - 17,3Ni - 17,7Cr - 25,8Mo... (a).$

Compendio de la invención

Problemas que busca resolver la invención

20 En una soldadura de alta densidad energética según la técnica relacionada, un metal conjugado de la sección soldable se contrae a una temperatura cercana a la temperatura ambiente durante la fase final de la soldadura, de modo tal que se induce la tensión residual de tracción. Existe un caso en el cual la resistencia a la fatiga se reduce significativamente por el efecto de la razón de tensiones. Debido a esto, con respecto a la vibración en el rango de los gigaciclos, existe un problema en el sentido de que la tensión residual de tracción produce un agrietamiento por fatiga.

25 Un objetivo de la invención es proporcionar una junta de soldadura con propiedades de fatiga que pueda resistir la vibración en el rango de los gigaciclos, y que posea suficiente tenacidad a la fractura.

Métodos para resolver el problema

La invención ha adoptado los siguientes medios para lograr el objetivo resolviendo los problemas indicados anteriormente.

30 Estos son, (1) una junta de soldadura conforme a un aspecto de la invención incluye: un par de materiales de acero; y un metal de soldadura formado por un haz de alta densidad energética en la sección de la soldadura a tope que se encuentra entre el par de materiales de acero,

donde el contenido de C en el par de materiales de acero se encuentra en el rango de 0,01 a 0,08 % en masa,

35 donde la temperatura de inicio de la transformación Ms, que se calcula mediante la siguiente fórmula (a) empleando una composición en % en masa del metal de soldadura, es de 250 °C o menos,

donde se imparte una tensión residual de compresión en la sección de la soldadura a tope, debido a la transformación del metal de soldadura en martensita,

donde el espesor del material de acero es de 30 mm a 200 mm,

donde el haz de alta densidad energética es un haz de electrones, y

40 donde la tensión de tracción del par de materiales de acero (1) es de 690 MPa o inferior

$Ms (°C) = 371 - 353C - 22Si - 24,3Mn - 7,7Cu - 17,3Ni - 17,7Cr - 25,8-Mo... (a).$

(2) En la junta de soldadura que se describe en (1), es preferible que la composición del metal de soldadura contenga de 0,5 a 4,0 % en masa de Ni y 0,5 a 6,0 % en masa de Cr.

(3) En la junta de soldadura que se describe en (2), es preferible que la composición del metal de soldadura contenga uno o dos de 0,1 a 2,0 % en masa de Mo y 0,1 a 5,0 % en masa de Cu, y que contenga Ni, Cr, Mo, y Cu en una cantidad de 1,1 a 10,0 % en masa en total.

5 (4) En la junta de soldadura que se describe en (1), es preferible que la composición del metal de soldadura contenga 4,0 a 6,0 % en masa de Ni.

(5) En la junta de soldadura que se describe en (4), es preferible que la composición del metal de soldadura contenga uno o dos o más de 0,1 a 6,0 % en masa de Cr, 0,1 a 2,0 % en masa de Mo, y 0,1 a 5,0 % en masa de Cu, y que contenga Ni, Cr, Mo, y Cu en una cantidad de 4,1 a 10,0 % en masa en total.

10 (6) En la junta de soldadura que se describe en (5), es preferible que el índice de templabilidad D_I del metal de soldadura que se calcula según la siguiente fórmula (b) empleando la composición de % en masa del metal de soldadura sea de 0,1 a 3,0.

$$D_I = 0,36C^{1/2}(1+0,7Si)(1+3,33Mn)(1+0,35Cu)(1+0,36Ni)(1+2,16Cr)(1+3Mo) \quad (b)$$

15 (7) En la junta de soldadura que se describe en (1) a (5), es preferible que la composición del material de acero contenga 0,01 a 0,08 % en masa de C, 0,05 a 0,80 % en masa de Si, 0,8 a 2,5 % en masa de Mn, $\leq 0,03$ % en masa de P, $\leq 0,02$ % en masa de S, $\leq 0,008$ % en masa de Al, 0,005 a 0,030 % en masa de Ti, y un balance que comprenda hierro e impurezas inevitables.

(8) En la junta de soldadura que se describe en (7), es preferible que la composición del material de acero contenga uno o dos o más de 0,1 a 1,0 % en masa de Cu, 0,1 a 6,0 % en masa de Ni, 0,1 a 1,0 % en masa de Cr, 0,1 a 0,5 % en masa de Mo, 0,01 a 0,08 % en masa de Nb, 0,01 a 0,10 % en masa de V, y 0,0005 a 0,0050 % en masa de B.

20 (9) En la junta de soldadura que se describe en (1) a (5), es preferible que un espesor del material de acero sea de 30 mm a 200 mm.

(10) En la junta de soldadura que se describe en (1) a (5), es preferible que el haz de alta densidad energética sea un haz de electrones.

Efectos de la invención

25 De acuerdo con la junta de soldadura descrita anteriormente, como las condiciones de soldadura para generar tensión residual de compresión en lugar de tensión residual de tracción al momento de soldar en una sección de soldadura empleando un haz de alta densidad energética tal como un haz de electrones, y similares, se selecciona una condición capaz de reducir una temperatura de inicio de la transformación de un metal de soldadura. Debido a esto, como la tensión residual de compresión se aplica a la sección de soldadura después de soldar al expandir el
30 metal de soldadura a una temperatura baja, las propiedades de fatiga mejoran.

Además, cuando se obtiene una junta de soldadura a tope de un modo tal que la soldadura se realiza irradiando un acero de alta resistencia, en particular, una placa de acero con un espesor de 30 mm o superior, con un haz de alta densidad energética, se puede formar una junta de soldadura con propiedades de resistencia a la fatiga en un entorno vibratorio dentro del rango de los gigaciclos, así como un valor suficientemente alto de tenacidad a la
35 fractura.

Breve descripción de los dibujos

La FIG. 1A es una vista transversal que muestra, en la dirección del espesor, un estado de una junta de soldadura a tope antes de la soldadura, conforme a una realización de la invención.

40 La FIG. 1B es una vista transversal que muestra, en la dirección del espesor, un estado de la junta de soldadura a tope después de la soldadura.

La FIG. 2 es una vista que muestra una posición de muestreo en una pieza de la junta de soldadura a tope sometida a ensayo de fatiga.

Descripción detallada de la invención

45 Una junta de soldadura 10 realizada mediante haz de alta densidad energética (en adelante denominada junta de soldadura) conforme a una realización de la invención se describirá en relación con la FIG. 1B. La junta de soldadura 10 es una soldadura que emplea un haz de alta densidad energética, y como haz de alta densidad energética, en esta realización se utiliza un haz de electrones. Además del haz de electrones, se puede usar un método de soldadura (soldadura por haz de electrones con presión reducida: RPEBW) que posibilite la construcción a vacío bajo, o bien una soldadura por haz láser.

50 La junta de soldadura 10 incluye un par de materiales de acero (metal base de soldadura) 1, y un metal de soldadura 4 que se suelda mediante un haz de electrones a formarse en una sección de soldadura a tope 6 ubicada entre el

par de materiales de acero 1. Aquí, una temperatura de inicio de la transformación martensítica M_s ($^{\circ}\text{C}$) que se calcula a partir de la siguiente fórmula (a) empleando una composición (% en masa) del metal de soldadura 4 es de 250°C o inferior.

$$M_s = 371 - 353C - 22Si - 24,3Mn - 7,7Cu - 17,3Ni - 17,7Cr - 25,8Mo... (a)$$

5 Los inventores han descubierto que la temperatura de inicio de la transformación está sobreestimada en una fórmula que estima una temperatura de inicio de la transformación martensítica que ha sido generalmente conocida, ya que la velocidad de enfriamiento de la sección de soldadura 6 en la junta de soldadura 10 es alta. Por lo tanto, la fórmula (a) se obtiene a partir de corregir una fórmula que estima una temperatura inicial de una transformación general.

10 De forma adicional, resulta deseable que una temperatura final de la transformación martensítica (M_f ($^{\circ}\text{C}$)) sea la temperatura ambiente.

Además, en general, las transformaciones que se inician a 250°C o menos se consideran transformaciones martensíticas. No obstante, en la invención, no es necesario garantizar que la transformación martensítica comience exactamente a 250°C o menos, y es suficiente que se inicie una transformación que se expanda en volumen a 250°C o menos. Así, en la invención, la temperatura calculada mediante la fórmula (a) simplemente puede ser de 250°C o menos. Además, de ahora en adelante, M_s se designará simplemente como temperatura de inicio de la transformación.

A continuación se describirá el método de soldadura con haz de alta densidad energética empleado en la junta de soldadura 10 en relación con la FIG. 1A.

20 En la FIG. 1A, se muestra una vista esquemática de un método de soldadura mediante haz de alta densidad energética. Tal como se muestra en la FIG 1A, se inserta un metal de inserción 3 dentro de una ranura 2 entre el par de materiales de acero 1, y el metal de inserción 3 y la superficie de la ranura 2 en el par de materiales de acero 1 se sueldan mediante el haz de alta densidad energética.

25 Como se muestra en la FIG. 1B, en un proceso en el cual el metal de soldadura 4 formado en la sección de soldadura 6 se solidifica, y luego el metal de soldadura 4 se enfría a temperatura ambiente, la transformación del metal de soldadura 4 comienza a una temperatura relativamente baja, esto es, a 250°C o menos. En un estado sostenido de tensión de compresión 5 generado en la sección de soldadura 6, la tensión de compresión 5 se mantiene hasta la temperatura ambiente por la expansión en la transformación del metal de soldadura 4. Entonces, la resistencia a la fatiga de la junta de soldadura 10 se puede mejorar.

30 Aquí, cuando la temperatura de inicio de la transformación es alta, una expansión del volumen del metal de soldadura no está lo suficientemente restringida en relación con la placa de acero que se encuentra alrededor de la sección de soldadura al momento de la expansión en la transformación del metal de soldadura, de modo tal que la tensión de compresión generada en la sección de soldadura se vea reducida. En este caso, en un proceso en el cual el metal de soldadura se transforma y se expande, y luego el metal de soldadura se enfría a temperatura ambiente, se genera tensión de tracción debido a la contracción por calor. La expansión en la transformación es compensada por la contracción por calor, de modo tal que el metal de soldadura formado en la sección de soldadura se encuentra en un estado de tensión residual de tracción, y la resistencia a la fatiga disminuye.

35 Por estos motivos, en la presente realización, el metal de inserción 3 se dispone en la ranura 2, que es una sección de tope del par de materiales de acero 1 al momento de soldar el par de materiales de acero, de modo que el metal de inserción 3 y el par de materiales de acero 1, esto es, los metales base, se funden para formar la junta de soldadura 10 mediante la soldadura que emplea un haz de electrones (haz de alta densidad energética). Para lograr en grado suficiente la mejora en la resistencia a la fatiga de la junta de soldadura 10, es necesario asegurar una fuerza de retención suficiente en el material de acero 1 alrededor del metal de soldadura 4. Por lo tanto, en la presente realización, para que la temperatura de inicio de la transformación M_s del metal de soldadura 4 formado en la sección de soldadura 6 de la junta de soldadura 10 sea de 250°C o inferior, se ajustarán los componentes del metal de inserción 3 y del material de acero. En general, el ancho del metal de soldadura se predice con antelación a las condiciones de soldadura, y similares. Por lo tanto, es fácilmente realizable ajustar los componentes del metal de soldadura a los componentes objetivo, esto es, ajustar la temperatura de inicio de la transformación M_s del metal de soldadura 4, según los componentes y dimensiones del metal de inserción 3, y los componentes y dimensiones del material de acero 1.

40 Como se ha descrito anteriormente, en la junta de soldadura 10 conforme a la presente realización, la temperatura de inicio de la transformación es 250°C o menos, de modo tal que el metal de soldadura 4 se transforma en martensita en un estado en el que no está en contacto con el material de acero 1. En este caso, el metal de soldadura 4 tiende a expandirse, con lo cual el metal de soldadura 4 se encuentra en un estado en el cual la tensión residual de compresión se imparte desde el material de acero 1. Como resultado, las propiedades de fatiga de la junta de soldadura 10 se mejoran hasta alcanzar una resistencia a la fatiga, capaz de soportar incluso un entorno vibratorio en el rango de los gigaciclos. Además, para mejorar la templeabilidad del metal de soldadura, se puede proporcionar la junta de soldadura 10, que se convierte en una estructura buena para tener suficiente tenacidad a la fractura.

El material de acero 1 utilizado en la junta de soldadura 10 conforme a esta realización no está particularmente limitado; sin embargo, resulta preferible utilizar un material de acero con espesor de placa de 30 mm o superior, o de 50 mm o superior, donde el problema indicado anteriormente se vuelve evidente. Además, es preferible que un valor límite superior del espesor de placa sea 120 mm o 200 mm. Se utiliza un par de materiales de acero; no obstante, este par de materiales de acero no tiene necesariamente el mismo espesor de placa, componentes, y similares.

De forma adicional, una composición de la placa de acero 1 utilizada en la junta de soldadura 10 conforme a la presente realización se ajusta según la composición y combinación del metal de inserción 3 a emplearse, de modo tal que la temperatura de inicio de la transformación del metal de soldadura 4 a formarse sea 250 °C o inferior. El material de acero 1 a utilizar no está particularmente limitado; no obstante, es preferible que el material de acero 1 sea un material de acero en el cual el contenido de C esté restringido a 0,2 % en masa o inferior, y en el cual, el límite elástico sea de 355 MPa o superior. La resistencia a la tracción se puede limitar a 690 MPa o inferior, o a 780 MPa o inferior. Como tal, se puede usar una placa de acero de alta resistencia, una placa de acero fabricada con un acero estructural para soldaduras que tenga una composición de componentes conocida.

Además, la composición del material de acero 1 no está particularmente limitada; no obstante, es preferible que la composición del material de acero 1 contenga, en % en masa, 0,01 a 0,08 % de C, 0,05 a 0,80 % de Si, 0,8 a 2,5 % de Mn, $\leq 0,03$ % de P, $\leq 0,02$ % de S, $\leq 0,008$ % de Al, 0,005 a 0,030 % de Ti, y un balance que consiste en hierro e impurezas inevitables. La composición se emplea como componente básico, y se puede usar un acero que contenga uno o dos tipos de Cr, Mo, Ni, Cu, W, Co, V, Nb, Ti, Zr, Ta, Hf, REM, Y, Ca, Mg, Te, Se, y B según las propiedades requeridas, tales como mejoras en la resistencia o tenacidad de las juntas del metal base (material de acero 1) y similares, en un 8 % o menos en total. Como ejemplo específico, es preferible que la composición del acero contenga, en % en masa, uno o dos tipos de 0,1 a 1,0 % de Cu, 0,1 a 6,0 % de Ni, 0,1 a 1,0 % de Cr, 0,1 a 0,6 % de Mo, 0,01 a 0,08 % de Nb, 0,01 a 0,10 % de V, y 0,0005 a 0,0050 % de B. Por su parte, cuando el material de acero 1 contenga dichos componentes de aleación, el precio del material de acero se vuelve muy caro. En la práctica, cuando se suelda empleando un material de inserción que contiene componentes de aleación expansivos, se puede obtener una junta de soldadura mucho más barata. Por este motivo, los componentes de aleación arriba descritos se pueden limitar. Por ejemplo, se puede usar el acero que contenga uno o dos tipos de Ni, Cr, Mo, y Cu en un 4 % o menos en total, en un 2 % o menos en total, o en un 1 % o menos en total. Además, se puede usar acero que contenga uno o dos tipos de Cr, Mo, Ni, Cu, W, Co, V, Nb, Ti, Zr, Ta, Hf, REM, Y, Ca, Mg, Te, Se, y B en un 4 % o menos en total, o en un 2 % en total.

A continuación, se describirá la necesidad de limitar los componentes del material de acero 1. Además, en las descripciones que siguen, % indica % en masa.

Para obtener una resistencia suficiente como acero para estructuras, es preferible que la cantidad de C contenida en el material de acero 1 sea del 0,01 % o superior. La cantidad de C contenida en el material de acero 1 se puede limitar al 0,02 % o superior, o al 0,03 % o superior, en caso de ser necesario. Para evitar una disminución de la tenacidad debido a un endurecimiento anormal del metal de soldadura 4, la cantidad de C se puede limitar al 0,12 % o inferior. La cantidad de C contenida en el material de acero 1 se puede limitar al 0,08 % o inferior, o 0,06 % o inferior, en caso de ser necesario.

Para obtener una excelente tenacidad en el metal de soldadura 4, es preferible que la cantidad de Si contenida en el material de acero 1 sea del 0,80 % o inferior. La cantidad de Si contenida en el material de acero 1 se puede limitar al 0,50 % o inferior, 0,30 % o inferior, o 0,15 % o inferior, en caso de ser necesario. El límite inferior del contenido de Si no necesita ser particularmente determinado; no obstante, es preferible que el contenido de Si sea del 0,05 % o superior, de modo que pueda llevar a cabo un adecuado tratamiento desoxidante. El contenido de Si se puede limitar al 0,08 % o superior, en caso de ser necesario.

El Mn es un elemento barato que ejerce un considerable efecto de optimización en las microestructuras. Para garantizar una resistencia y la tenacidad requeridas en el acero para estructuras, es preferible que se añada una cantidad de Mn de 0,8 a 2,5 % al material de acero 1. Para evitar el endurecimiento anormal del metal de soldadura 4, el límite superior de la cantidad de Mn contenida en el material de acero 1 se puede limitar a 2,3 %, 2,0 %, o 1,9 %.

P y S son impurezas inevitables. Sin embargo, debido a que éstas deterioran la tenacidad, y similares, es preferible que P y S se limiten respectivamente al 0,03 % o inferior, y al 0,02 % o inferior. Para mejorar la tenacidad, será preferiblemente menor, y el límite superior de la cantidad de P contenida en el material de acero 1 se puede limitar al 0,02 %, 0,015 %, o 0,010 %, y el límite superior de la cantidad de S se puede limitar al 0,015 %, 0,010 %, o 0,006 %.

Para mejorar la tenacidad del metal de soldadura 4, es preferible que el contenido de Al del material de acero 1 sea del 0,008 % o inferior. Para mejorar la tenacidad, el límite superior del contenido de Al se puede limitar a 0,006 %, 0,005 %, o 0,003 %.

Para mejorar la tenacidad del metal de soldadura 4, es preferible que se genere óxido de Ti en cantidad adecuada. Debido a esto, es preferible que la cantidad de Ti contenida en el material de acero 1 sea de 0,005 a 0,030 %. El

límite superior del contenido de Ti se puede limitar a 0,025 %, 0,020 %, o 0,015 %, en caso de ser necesario. Además, el límite inferior del contenido de Ti se puede limitar a 0,007 %, o 0,009 %.

5 El Cu es un elemento que mejora la resistencia o la tenacidad del material de acero 1, y se puede añadir en caso de ser necesario. Para mejorar la resistencia o la tenacidad, se puede añadir Cu en 0,1 % o superior, o en 0,3 % o superior. Mientras tanto, para prevenir defectos o similares en el material de acero 1 como resultado de añadir una alta cantidad de Cu, es preferible que el límite superior del contenido de Cu sea del 1,0 %. El límite superior del contenido de Cu se puede limitar a 0,7 % o 0,5 %, en caso de ser necesario.

10 El Ni es un elemento eficaz para mejorar la tenacidad del material de acero 1 y del metal de soldadura 4, y se puede añadir una cantidad de Ni del 0,1 % o superior al material de acero 1. Por su parte, el Ni es caro, y por tanto, es preferible que la cantidad de Ni sea del 6,0 % o inferior. Para reducir el precio del material de acero 1, el límite superior del contenido de Ni se puede limitar al 2,0 %, 1,0 %, o 0,5 %.

15 El Mo es un elemento eficaz para mejorar la resistencia, y se puede añadir una cantidad de Mo del 0,1 % o superior al material de acero 1, en caso de ser necesario. El metal de soldadura 4 sufre un endurecimiento anormal cuando se añade una alta cantidad de Mo, lo cual resulta en una disminución de la tenacidad. Por lo tanto, es preferible que la cantidad de Mo sea 0,6 % o inferior. La cantidad de Mo contenida en el material de acero 1 se puede limitar a 0,2 % o inferior, o a 0,15 % o inferior, en caso de ser necesario.

20 El Nb es un elemento eficaz para mejorar la resistencia o tenacidad del material de acero 1, y se puede añadir la cantidad de Nb del 0,01 % o superior al material de acero 1, en caso de ser necesario. La tenacidad del metal de soldadura 4 disminuye cuando se añade una alta cantidad de Nb; por lo tanto, es preferible que el contenido de Nb sea del 0,08 % o inferior. El contenido de Nb se puede limitar a 0,05 % o inferior, o a 0,03 % o inferior, en caso de ser necesario.

25 El V es un elemento eficaz para mejorar la resistencia del material de acero 1, y se puede añadir una cantidad de V del 0,01 % o superior, en caso de ser necesario. La tenacidad del metal de soldadura 4 disminuye cuando se añade una alta cantidad de V; por lo tanto, es preferible que el contenido de V sea del 0,10 % o inferior. El contenido de V se puede limitar a 0,07 % o inferior, o a 0,04 % o inferior, en caso de ser necesario.

30 El B es un elemento eficaz para mejorar la resistencia del material de acero 1, y se puede añadir una cantidad de B del 0,0005 % o superior al material de acero 1, en caso de ser necesario. La tenacidad del metal de soldadura 4 disminuye cuando se añade una alta cantidad de B; por lo tanto, es preferible que el contenido de B sea del 0,0050 % o inferior. El contenido de B se puede limitar a 0,0020 % o inferior, o a 0,0015 % o inferior, en caso de ser necesario.

Ca y REM son elementos eficaces para mejorar las propiedades de resistencia al desgarro laminar, y se puede añadir una cantidad de Ca y REM del 0,0005 % o superior al material de acero 1, en caso de ser necesario. La tenacidad del material de acero 1 disminuye cuando se añade una alta cantidad de Ca y REM; por lo tanto, es preferible que el contenido de Ca y REM sea del 0,0050 % o inferior.

35 El Mg es un elemento eficaz para mejorar la tenacidad de las zonas soldadas afectadas por el calor del material de acero 1, y se puede añadir una cantidad de Mg del 0,0003 % o superior. La tenacidad del material de acero disminuye cuando se añade una alta cantidad de Mg; por lo tanto, es preferible que el contenido de Mg sea del 0,0050 % o inferior.

40 Es preferible que la composición del metal de soldadura 4 contenga de 0,5 a 4,0 % de Ni y de 0,5 a 6,0 % de Cr. Debido a esto, la temperatura de inicio de la transformación Ms fácilmente alcanza 250 °C o inferior. Además, al suprimir el contenido de Ni, que es caro, se puede obtener una junta de soldadura 10 con resistencia a la fatiga mejorada a un bajo coste. En este caso, es preferible que la composición del acero contenga, en % en masa, uno o dos tipos de 0,1 a 2,0 % de Mo, y 0,1 a 5,0 % de Cu, y que contenga Ni, Cr, Mo, y Cu de 1,1 a 10,0 % en total. De este modo, al permitir que el acero contenga uno o dos tipos de Mo y Cu, se mejora la resistencia a la fatiga, y así se obtiene una tenacidad a la fractura suficiente.

45 De forma alternativa, la composición del metal de soldadura 4 puede contener, por ejemplo, 4,0 a 6,0 % de Ni, aparte de la composición anteriormente descrita. En este caso se aumenta el contenido de Ni, mejorando así la tenacidad. En este caso, es preferible que la composición del acero contenga, en % en masa, uno o dos tipos de 0,1 a 6,0 % de Cr, 0,1 a 2,0 % de Mo, y 0,1 a 5,0 % de Cu, y que contenga Ni, Cr, Mo, y Cu de 4,1 a 10,0 % en total. De este modo, al permitir que la composición del acero contenga uno o dos tipos de Mo y Cu, se mejora la resistencia a la fatiga, obteniendo así una tenacidad a la fractura suficiente.

55 El Ni es un elemento eficaz para mejorar la resistencia a la fatiga de la junta de soldadura 10 al reducir la temperatura de inicio de la transformación Ms del metal de soldadura 4. Además, el Ni es un elemento que mejora las propiedades de las juntas, tales como la resistencia, tenacidad, y similares. Es preferible que el límite inferior del contenido de Ni, en caso de que el metal de soldadura contenga Ni, sea del 0,5 % como valor mínimo en el cual se puede esperar un efecto de mejora suficiente de la resistencia a la fatiga. Para mejorar de manera fiable la resistencia a la fatiga, es más preferible que el límite inferior del contenido de Ni sea de 1,0 % o 2,0 %. Además,

cuando el contenido de Ni del metal de soldadura exceda el 6,0 %, se puede terminar el enfriamiento mientras la austenita permanece sin transformarse en bainita o martensita, en donde el material de soldadura 4 se transforma a una temperatura más baja, de modo tal que no se puede esperar la mejora de la resistencia a la fatiga. Por esto, es preferible que el límite superior del contenido de Ni sea del 6,0 %.

- 5 El Cr y el Mo son elementos que garantizan la templabilidad al reducir la temperatura de inicio de la transformación Ms del metal de soldadura 4 para mejorar la resistencia. En particular, el Cr y el Mo tienen efectos superiores para mejorar la resistencia del metal de soldadura 4 y garantizar la templabilidad del mismo, en comparación con el Ni. Con el fin de mejorar aun más la resistencia a la fatiga de la junta de soldadura 10 transformando, mediante dichos efectos, el metal de soldadura 4 en una estructura en la cual la temperatura de transformación como la martensita o similar es baja, es preferible que el contenido de Cr y Mo sea del 0,1 % o superior. Por su parte, el Cr y el Mo tienen efectos bajos para mejorar la tenacidad del metal de soldadura 4 en comparación con el Ni, de modo tal que la tenacidad del metal de soldadura 4 se puede reducir cuando se añade una alta cantidad de Cr y Mo. De este modo, resulta preferible que el límite superior del contenido de Cr sea 6,0 %, y que el límite superior del contenido de Mo sea 2,0 %.
- 10
- 15 Además, cuando el contenido de Ni es del 4,0 % o inferior, se requiere un contenido de Cr del 0,5 % o superior, de tal modo que permita que la temperatura de inicio de la transformación Ms del metal de soldadura 4 sea de manera fiable de 250 °C o inferior. Cuando el contenido de Ni es del 2,0 % o inferior, el límite inferior del contenido de Cr se puede limitar al 1,5 % o 2 %, y cuando el contenido de Ni es del 1,0 % o menos, el límite inferior del contenido de Cr se puede limitar al 2,0 % o 2,5 %. Para evitar una disminución de la tenacidad del metal de soldadura 4, el límite inferior del contenido de Cr se puede limitar al 4,0 % o 3,0 %. Por el mismo motivo, el límite inferior del contenido de Mo se puede limitar al 1 %, 0,5 %, o 0,2 %. Incluso cuando el contenido de Ni exceda el 4,0 %, el límite inferior del contenido de Cr se puede limitar al 0,5 %, en caso de ser necesario.
- 20

El Cu también es un elemento eficaz para disminuir la temperatura de inicio de la transformación Ms del metal de soldadura 4, mejorando la resistencia y asegurando la templabilidad, de modo similar al Cr y al Mo. Para obtener efectos tales como reducir la temperatura de inicio de la transformación Ms, mejorar la resistencia, y garantizar la templabilidad, es preferible que el límite inferior del contenido de Cu sea del 0,1 %. No obstante, cuando se añade Cu en exceso en el metal de soldadura, puede generarse un agrietamiento por Cu en dicho metal, por lo cual es preferible que el límite superior del contenido de Cu sea del 5,0 %. Más preferiblemente, el límite superior del contenido de Cu será del 0,3 %.

25

30 El metal de soldadura 4 de la invención puede contener elementos de componentes dentro del siguiente rango a los fines que se detallan a continuación.

El B es un elemento que mejora significativamente la templabilidad, y permite que la microestructura del metal de soldadura 4 tenga una mayor resistencia al asegurar la templabilidad del metal de soldadura 4. Además, el B suprime la generación de una estructura en la cual la transformación se inicie una temperatura alta, de modo tal que la estructura se convierte en una microestructura en la cual la transformación se lleva a cabo a una temperatura más baja. En general, como el metal de soldadura 4 tiene un alto contenido de oxígeno en comparación con el material de acero 1, B se une al oxígeno, los efectos anteriormente descritos pueden verse reducidos. No obstante, en la soldadura RPEB, que es un objetivo de la presente realización, la cantidad de oxígeno o nitrógeno es extremadamente baja, por lo tanto, el límite inferior del contenido de B del 0,0003 % es suficiente para mejorar la templabilidad, debido a la presencia de B entre los metales de soldadura, y para mejorar la resistencia a la tracción y a la fatiga debido a un control de la microestructura. Por su parte, los efectos producidos por la adición de B no aumentan de forma significativa incluso cuando se añade una cantidad de B por encima del 0,0003 %, por lo cual es preferible que el límite superior de la cantidad de B añadido sea del 0,005 %.

35

40

Tanto el Nb, el V, y el Ti son elementos que forman un carburo en el metal de soldadura 4 para aumentar la resistencia, y el metal de soldadura 4 contiene uno o dos tipos de Nb, V, y Ti en baja cantidad, mejorando así la resistencia de la junta. Cuando el límite inferior del contenido total de Nb, V, y Ti de uno o dos tipos es menor al 0,005 %, no se puede esperar una mejora significativa en la resistencia de la junta, por lo cual resulta preferible que el límite inferior del contenido total sea del 0,005 %. Por su parte, cuando el contenido total supera el 0,3 %, la resistencia del metal de soldadura 4 aumenta excesivamente, lo cual ocasiona problemas como resultado de las propiedades de las juntas; por lo tanto, es preferible que el límite superior del contenido total sea del 0,3 %. Además, el Ti estabiliza un arco de soldadura de forma adicional al efecto de mejorar la resistencia del metal de soldadura 4, por lo tanto, es preferible que el límite inferior del contenido de Ti sea del 0,003 % cuando el Ti esté presente. Además, para mejorar la tenacidad del metal de soldadura 4, el límite inferior del contenido de Al se puede limitar al 0,003 %, 0,005 % o 0,008 %.

45

50

55 Una soldadura por haz de electrones, y similares, se realiza empleando el metal de inserción 3 para permitir que la composición del metal de soldadura 4 sea la misma que la del anterior. Debido a que el ancho de las perlas, esto es, el ancho del metal de soldadura 4 puede estimarse con alta precisión a partir de las condiciones de soldadura, se pueden seleccionar los componentes y el espesor del metal de inserción 3 de modo tal que sean componentes del metal de soldadura 4, que es un objetivo. Por ejemplo, como metal de inserción 3, se puede usar una lámina

metálica que contenga uno o dos tipos de Ni puro o de 1 a 10 % de Ni, 0,1 a 2,0 % de Cr, 0,1 a 2,0 % de Mo, y 0,1 a 5,0 % de Cu, de 0,5 a 10,0 % en total.

5 En la presente realización, es preferible que la dureza del metal de soldadura 4 esté dentro del 140 % de la dureza del material de acero 1, que es el metal de base. Es preferible que el metal de soldadura 4 se someta a la estructuración martensítica para que el grado de expansión al momento de la transformación del metal de soldadura 4 pueda usarse a temperatura ambiente al reducir la temperatura de inicio de la transformación Ms. Sin embargo, cuando la estructura del metal de soldadura 4 es demasiado dura, puede producirse una reducción del valor de tenacidad a la fractura δ_c debido a un aumento de la tensión local; por esto es preferible que la dureza del metal de soldadura 4 se restrinja al 140 % o menos.

10 Al satisfacer las condiciones en que la composición del metal de soldadura 4 contiene uno o dos tipos de 0,5 a 6,0 % de Ni, 0,1 a 6,0 % de Cr, 0,1 a 2,0 % de Mo, y 0,1 a 5,0 % de Cu en un 0,5 a 10,0 % en total, y preferiblemente, contiene en un 1,1 a 10,0 %, es preferible que se ajuste apropiadamente un balance entre los componentes con el metal de soldadura 4 formado usando el material de acero 1, que es el material de base, y el metal de inserción 3, o que se ajuste una tasa de enfriamiento posterior a la soldadura. De este modo, se puede evitar que la dureza del metal de soldadura 4 sea demasiado alta, de tal modo que se puede ajustar la diferencia de dureza entre el metal de soldadura 4 y el material de acero 1 (la dureza del metal de soldadura 4 se encuentra dentro del 140 % de la dureza del material de acero 1).

20 Además, para reducir de manera fiable la temperatura de inicio de la transformación Ms del metal de soldadura 4, el contenido total de Ni, Cr, Mo, y Cu en el metal de soldadura 4 se puede limitar al 0,5 % o superior, 1,0 %, 2,0 %, o 3,0 % o superior.

Además, para mejorar la tenacidad del metal de soldadura 4 a partir de prevenir el endurecimiento anormal del metal de soldadura 4, es preferible que el índice de templabilidad D_I del metal de soldadura 4, que se calcula a través de la siguiente fórmula (b) usando la composición del metal de soldadura 4, sea de 0,1 a 3,0.

$$D_I = 0,36C^{1/2}(1+0,7Si)(1+3,33Mn)(1+0,35Cu)(1+0,36Ni)(1+2,16Cr)(1+3Mo)... \quad (b)$$

25 Cuando el índice de templabilidad D_I del metal de soldadura 4 supera 3,0, la dureza del metal de soldadura se incrementa, y esto lleva a una disminución de la tenacidad, por lo tanto, es preferible que el índice de templabilidad D_I sea 3,0 o inferior. El límite superior del índice de templabilidad D_I se puede limitar a 1,2, 0,9, o 0,7, en caso de ser necesario. Por su parte, cuando el índice de templabilidad D_I es demasiado bajo, el metal de soldadura 4 no se somete a estructuración martensítica, por lo tanto, es preferible que el índice de templabilidad D_I sea 0,1 o superior.

30 Por lo tanto, el metal de soldadura 4 se somete de manera fiable a estructuración martensítica, el límite inferior del índice de templabilidad D_I se puede limitar a 0,2 o superior, 0,25 o superior, o 0,3 o superior.

35 En la presente realización, la condición de la soldadura que emplea el haz de alta densidad energética no está particularmente limitada; no obstante, por ejemplo, en el caso de la soldadura por haz de electrones, la soldadura se realiza bajo condiciones tales como un voltaje de 175V, una corriente de 120 mA, una velocidad de soldadura de 125 mm/min, y similares, cuando se utiliza un espesor de placa de 80 mm. Además, la soldadura por haz de electrones se lleva a cabo a alto vacío, generalmente, menor o igual a 10 a 3 mbar; sin embargo, esta realización puede aplicarse incluso a una junta de soldadura realizada a un grado bajo de vacío, tal como en el método descrito anteriormente de RPEBW, por ejemplo, a un vacío de aproximadamente 1 mbar.

40 Además, debido a que la región de irradiación del haz de electrones aumenta al momento de la soldadura por haz de electrones, un aporte de calor aplicado al material de acero 1 es excesivamente elevado, y se engrosa la estructura de una unidad LF (Línea de Fusión, una unidad límite entre el material de acero 1 y el metal de soldadura 4); por lo tanto, no es preferible al estabilizar y garantizar el valor de tenacidad a la fractura δ_c de la unidad LF.

45 Además, cuando la junta de soldadura 10 se fabrica mediante soldadura RPEBW, el ancho del metal de soldadura tiende a incrementarse en comparación con una junta de soldadura fabricada mediante soldadura por haz de electrones (soldadura EBW, por sus siglas en inglés, Electron Beam Welding) en un estado de alto vacío dentro de una cámara de vacío.

50 Por este motivo, en esta realización, incluso en caso de emplear la soldadura RPEBW, resulta preferible que el ancho w del metal de soldadura 4 que se muestra en la FIG. 1B sea un 20 % o inferior, o un 10 % o inferior del espesor de placa t del material de acero 1, que es el material de base, para estabilizar y asegurar el valor de tenacidad a la fractura δ_c de la junta de soldadura 10.

En esta realización, se utiliza el haz de electrones como el haz de alta densidad energética para que sea adecuado para lograr un calentamiento local rápido y un rápido enfriamiento de la sección de soldadura 6; sin embargo, la invención no está limitada al mismo.

55 A continuación, se describirá la invención sobre la base de un ejemplo; no obstante, las condiciones en el ejemplo son un primer ejemplo de condiciones adoptadas con el fin de comprobar la variabilidad y eficacia de la invención, y ésta no se limita al primer ejemplo de condiciones. Esto es, la invención puede adoptar una variedad de condiciones

o una combinación de condiciones, siempre que las condiciones o la combinación puedan alcanzar el propósito de la invención sin desviarse del fundamento de la invención.

Ejemplos

5 El metal de inserción que tiene los componentes que se muestran en la Tabla 2 se insertó empleando los materiales de acero 1 a 20, que tienen una composición química que se muestra en la Tabla 1, y se sometió a soldadura a tope por haz de electrones y a soldadura por haz láser bajo las condiciones de soldadura indicadas en la Tabla 3 para así formar una junta de soldadura.

Tal como se ha descrito anteriormente, se obtuvo una temperatura de inicio de la transformación Ms (°C), que se muestra en la Tabla, a través de la fórmula de Ms = 371 - 353C - 22Si - 24,3Mn - 7,7Cu - 17,3Ni - 17,7Cr - 25,8Mo.

10 En la junta de soldadura que se muestra en la FIG. 2, se concibió el muestreo de una pieza de ensayo 23 de fatiga en juntas, y una superficie trasera 23a de la pieza de ensayo 23 de fatiga en juntas, se sometió a trituración mecánica, de tal modo que se generó una grieta por fatiga a partir de una superficie lateral de la pieza de ensayo. Se llevó a cabo un ensayo de fatiga con una fuerza axial, una relación de tensiones de 0,1, y una tasa de repetición de 5Hz, calculando así una resistencia a la fatiga a 2×10^6 ciclos. Además, en la junta de soldadura que se muestra

15 en la FIG. 2, se realizó un muestreo de una pieza de ensayo 24 ultrasónico, calculándose una resistencia a la fatiga a 2×10^6 ciclos y una resistencia a la fatiga en un gigaciclo hasta 2×10^9 veces con el fin de calcular la tasa de reducción, la resistencia la fatiga a 2×10^6 ciclos calculada mediante el ensayo de fatiga en juntas se multiplicó por la tasa de reducción, y se evaluó la resistencia a la fatiga en juntas (valor estimado) bajo el gigaciclo. Los resultados, junto con las condiciones de soldadura, se muestran en las Tablas 4 y 5.

20 Tabla 1

| (% en masa) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|------|-----|-----|------|-----|-------|-------|------|------|-----|-------|--------|-------|
| Tipo de acero | C | Si | Mn | Ni | Cu | Cr | Ti | Al | Nb | V | Mo | P | B | S |
| Acero 1 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 0,3 | 0,3 | | 0,01 | 0,003 | | | | 0,005 | | 0,002 |
| Acero 2 | 0,02 | 0,11 | 2,2 | 0,5 | 0,5 | 0,2 | 0,01 | 0,002 | | | 0,1 | 0,004 | | 0,002 |
| Acero 3 | 0,08 | 0,22 | 1,5 | | | 0,5 | 0,01 | 0,003 | | | | 0,007 | | 0,002 |
| Acero 4 | 0,05 | 0,05 | 2,5 | | | | 0,03 | 0,002 | | | | 0,005 | | 0,002 |
| Acero 5 | 0,05 | 0,06 | 1,8 | 0,1 | 0,1 | | 0,02 | 0,004 | 0,01 | | | 0,005 | 0,0005 | 0,003 |
| Acero 6 | 0,05 | 0,08 | 1,6 | 0,5 | 0,4 | | 0,03 | 0,006 | | 0,02 | 0,1 | 0,004 | 0,001 | 0,002 |
| Acero 7 | 0,012 | 0,76 | 1,2 | 5,8 | 0,9 | | 0,005 | 0,002 | | | | 0,002 | | 0,001 |
| Acero 8 | 0,01 | 0,3 | 0,8 | | 0,01 | 0,9 | 0,02 | 0,06 | 0,08 | 0,1 | | 0,002 | 0,005 | 0,003 |
| Acero 9 | 0,05 | 0,06 | 1,8 | 0,1 | 0,1 | | 0,02 | 0,004 | 0,01 | 0,01 | 0,5 | 0,005 | 0,0005 | 0,003 |

Tabla 2

| (% en masa) | | | | |
|-------------|-----|----|----|----|
| | Ni | Cr | Mo | Fe |
| Lámina 1 | 100 | | | - |
| Lámina 2 | 50 | 50 | | - |
| Lámina 3 | 20 | 30 | 1 | 49 |

Tabla 3

| Método | Estado N° | Voltaje de aceleración | Corriente del haz | Velocidad de soldadura | Grado de vacío |
|-------------------|--------------|------------------------|-------------------|------------------------|----------------|
| Haz de electrones | W1 | 150 kV | 180 mA | 25 cm/min | 7Pa |
| | W2 | 150 kV | 180 mA | 21 cm/min | 0,07Pa |
| | W3 | 150 kV | 170 mA | 15 cm/min | 0,07Pa |
| | W4 | 150 kV | 150 mA | 10 cm/min | 7Pa |
| | W5 | 150 kV | 180 mA | 10 cm/min | 0,07Pa |
| | W6 | 150 kV | 155 mA | 10 cm/min | 0,07Pa |
| | W7 | 150 kV | 180 mA | 30 cm/min | 7Pa |
| | | | | | |
| Método | Condición N° | Rendimiento | Medio | Velocidad de soldadura | Atmósfera |
| Soldadura láser | W8 | 15 kV | YAG | 90 cm/min | Argón |

Tabla 4

| Junta N° | Material de acero | | Condiciones de soldadura | | | | | Composición química del metal de soldadura (% en masa) | | | | | | | |
|----------|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|
| | Tipo de acero | Espesor de la placa | Estado de soldaduras | Inserción de lámina | Tipo de lámina insertada | Espesor de la lámina (mm) | Ancho de la sección de fusión (mm) | C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | Cu | Cantidad total de Ni, Cr, Mo, y Cu |
| Junta 1 | Acero 1 | 50 | W1 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 4,5 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 4,7 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 5,0 |
| Junta 2 | Acero 1 | 50 | W1 | No | - | 0 | 3,6 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,6 |
| Junta 3 | Acero 1 | 50 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 4,1 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 5,5 |
| Junta 4 | Acero 1 | 50 | W2 | Sí | Lámina 2 | 0,3 | 4,3 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 3,8 | 3,5 | 0,0 | 0,3 | 7,6 |
| Junta 5 | Acero 1 | 80 | W3 | Sí | Lámina 2 | 0,2 | 3,8 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 2,9 | 2,6 | 0,0 | 0,3 | 5,9 |
| Junta 6 | Acero 1 | 80 | W3 | No | - | 0 | 4,8 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,6 |
| Junta 7 | Acero 1 | 120 | W4 | Sí | Lámina 2 | 0,3 | 5,5 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 3,0 | 2,7 | 0,0 | 0,3 | 6,1 |
| Junta 8 | Acero 1 | 120 | W4 | No | - | 0 | 6,2 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 0,6 |
| Junta 9 | Acero 2 | 80 | W5 | Sí | Lámina 2 | 0,2 | 5,4 | 0,02 | 0,11 | 2,2 | 2,4 | 2,1 | 0,1 | 0,5 | 5,0 |
| Junta 10 | Acero 2 | 80 | W5 | No | - | 0 | 5,4 | 0,02 | 0,11 | 2,2 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 1,3 |
| Junta 11 | Acero 3 | 100 | W6 | Sí | Lámina 3 | 0,4 | 7,2 | 0,08 | 0,22 | 1,5 | 2,8 | 3,3 | 0,0 | 0,0 | 6,1 |
| Junta 12 | Acero 3 | 100 | W6 | No | - | 0 | 7,2 | 0,08 | 0,22 | 1,5 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |
| Junta 13 | Acero 4 | 60 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,25 | 3,8 | 0,05 | 0,05 | 2,5 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,6 |
| Junta 14 | Acero 5 | 60 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,3 | 3,9 | 0,05 | 0,06 | 1,8 | 7,8 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 7,9 |
| Junta 15 | Acero 6 | 60 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 3,8 | 0,05 | 0,08 | 1,6 | 5,8 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 6,3 |

| Junta N° | Material de acero | | Condiciones de soldadura | | | | | Composición química del metal de soldadura (% en masa) | | | | | | | |
|----------|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|
| | Tipo de acero | Espesor de la placa | Estado de soldaduras | Inserción de lámina | Tipo de lámina insertada | Espesor de la lámina (mm) | Ancho de la sección de fusión (mm) | C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | Cu | Cantidad total de Ni, Cr, Mo, y Cu |
| Junta 16 | Acero 7 | 60 | W2 | No | - | 0 | 3,6 | 0,01 | 0,76 | 1,2 | 5,8 | 0,0 | 0,0 | 0,9 | 6,7 |
| Junta 17 | Acero 8 | 60 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 3,8 | 0,01 | 0,30 | 0,8 | 5,3 | 0,9 | 0,0 | 0,0 | 6,2 |
| Junta 18 | Acero 9 | 60 | W2 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 3,9 | 0,05 | 0,06 | 1,8 | 5,2 | 0,0 | 0,5 | 0,1 | 5,8 |
| Junta 19 | Acero 1 | 30 | W7 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 3,1 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 7,1 |
| Junta 20 | Acero 1 | 15 | W8 | Sí | Lámina 1 | 0,2 | 3,1 | 0,04 | 0,12 | 1,8 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 7,1 |

Tabla 5

| Junta N° | Temperatura de inicio de la transformación Ms (°C) (*5) | Valor DI (*6) | Medición del valor de tensión residual en la sección del extremo de soldadura (MPa) (*1) | Límite elástico del metal de base (MPa) | Resistencia a la fatiga de la junta a 2×10^6 ciclos (MPa) (*2) | Descenso de la tasa en el ensayo de fatiga ultrasónica (*3) | Resistencia a la fatiga de la junta bajo gijacicio (MPa) (*4) | Resistencia a la tracción de la junta (MPa) | Valor CTOD debajo de los -10 °C (mm) |
|----------|---|---------------|--|---|---|---|---|---|--------------------------------------|
| Junta 1 | 226 | 0,34 | -120 | 415 | 330 | 0,95 | 314 | 427 | 0,45 |
| Junta 2 | 303 | 0,22 | 120 | 415 | 210 | 0,91 | 191 | 427 | 0,55 |
| Junta 3 | 219 | 0,35 | -230 | 415 | 320 | 0,93 | 298 | 427 | 0,38 |
| Junta 4 | 181 | 0,94 | -220 | 415 | 330 | 0,91 | 300 | 427 | 0,39 |
| Junta 5 | 211 | 0,77 | -220 | 383 | 325 | 0,87 | 283 | 394 | 0,37 |
| Junta 6 | 303 | 0,22 | 180 | 383 | 190 | 0,87 | 165 | 394 | 0,44 |
| Junta 7 | 208 | 0,79 | -310 | 364 | 310 | 0,89 | 276 | 375 | 0,24 |
| Junta 8 | 303 | 0,22 | 215 | 364 | 180 | 0,89 | 160 | 375 | 0,72 |
| Junta 9 | 225 | 0,60 | -230 | 390 | 310 | 0,83 | 257 | 402 | 0,45 |
| Junta 10 | 289 | 0,24 | 280 | 390 | 185 | 0,83 | 154 | 402 | 0,77 |
| Junta 11 | 195 | 1,08 | -170 | 425 | 300 | 0,88 | 264 | 438 | 0,42 |
| Junta 12 | 293 | 0,39 | 280 | 425 | 165 | 0,88 | 145 | 438 | 0,56 |
| Junta 13 | 178 | 0,46 | -120 | 355 | 290 | 0,91 | 264 | 366 | 0,35 |
| Junta 14 | 173 | 0,43 | -180 | 360 | 260 | 0,83 | 216 | 371 | 0,42 |

| Junta N° | Temperatura de inicio de la transformación Ms (°C) (*5) | Valor DI (*6) | Medición del valor de tensión residual en la sección del extremo de soldadura (MPa) (*1) | Límite elástico del metal de base (MPa) | Resistencia a la fatiga de la junta a 2×10^6 ciclos (MPa) (*2) | Descenso de la tasa en el ensayo de fatiga ultrasónica (*3) | Resistencia a la fatiga de la junta bajo gijacicio (MPa) (*4) | Resistencia a la tracción de la junta (MPa) | Valor CTOD debajo de los -10 °C (mm) |
|----------|---|---------------|--|---|---|---|---|---|--------------------------------------|
| Junta 15 | 207 | 0,44 | -185 | 355 | 270 | 0,79 | 213 | 366 | 0,32 |
| Junta 16 | 214 | 0,22 | -180 | 550 | 320 | 0,82 | 262 | 567 | 1,21 |
| Junta 17 | 234 | 0,22 | -200 | 320 | 250 | 0,81 | 203 | 330 | 0,5 |
| Junta 18 | 204 | 0,59 | -170 | 440 | 310 | 0,83 | 257 | 453 | 0,35 |
| Junta 19 | 191 | 0,39 | -145 | 415 | 345 | 0,91 | 314 | 427 | 0,67 |
| Junta 20 | 191 | 0,39 | -160 | 415 | 355 | 0,89 | 316 | 427 | 0,82 |

*1: Medida con método de corte por el medidor de distorsión fijado a la superficie del metal de base en una posición separada del metal de soldadura en 1mm (- : tensión de tracción, +: tensión de compresión)

*2: Resistencia a la fatiga a 10^6 ciclos de la pieza de ensayo de tensión en juntas tomada con un método que se muestra en la FIG. 3

*3: Relación entre la resistencia a la fatiga a 2×10^6 ciclos y a 2×10^9 ciclos en la pieza de ensayo de fatiga ultrasónica tomado en la posición que se muestra en la FIG. 3

*4: Valor estimado por: (Resistencia a la fatiga en las juntas a 2×10^6 ciclos obtenida con la pieza de ensayo de fatiga en juntas) x (tasa de disminución en el ensayo de fatiga ultrasónica)

*5: Valor calculado utilizando la fórmula (a)

*6: Valor calculado utilizando la fórmula (b)

5 Con respecto al rendimiento de la junta de soldadura, el valor de tenacidad a la fractura δc (mm) es un valor que se calcula a una temperatura de ensayo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un ensayo de desplazamiento de la apertura en el extremo de la grieta (CTOD, por sus siglas en inglés, Crack Tip Opening Displacement). El ensayo CTOD es uno de los ensayos que evalúan la tenacidad a la fractura de una estructura que posee un defecto, y en este ejemplo, se calculó un valor promedio de tres juntas de soldadura.

10 Una resistencia a la tracción en las juntas (MPa) fue un resultado obtenido de tal modo que se fabricó una pieza de ensayo No. U1 de un procedimiento de regulación de buques de acero/la misma inspección (material de la pieza K) de (mercancías) NK (Nippon Kaiji kyokai), y luego se sometió a un ensayo de tracción en juntas, y muestra la resistencia a la fractura.

15 En relación con las Tablas 4 y 5, se ha descubierto que la temperatura de inicio de la transformación supera los $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las juntas N° 2, 6, 8, 10, y 12; por lo tanto, la tensión residual de tracción se encuentra presente en la sección de soldadura del metal de soldadura 4, y se vieron significativamente reducidas la resistencia a la fatiga a 2×10^6 ciclos, y una resistencia a la fatiga en las juntas bajo el gigaciclo. En contraste, en las juntas N° 1, 3, 4, 5, 7, 9, 11, y 13 a 20, la transformación de la sección de soldadura se creó a una temperatura de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ o menos, y se ejerció una tensión residual de compresión, de modo que la totalidad de la resistencia a la fatiga a 2×10^6 ciclos excedía los 260 MPa, y la totalidad de la resistencia a la fatiga en las juntas bajo el gigaciclo excedía los 200 MPa. En consecuencia, se descubrió que la resistencia a la fatiga de la junta en el rango de los gigaciclos no se redujo significativamente en las juntas N°, 1,3, 4, 5, 7, 9, 11, y 13 a 20.

20 **Aplicabilidad industrial**

Conforme a la invención, cuando se suelda una placa de acero de alta resistencia mediante el haz de alta densidad energética para utilizarse como estructura de soldadura, la estructura de soldadura puede tener las propiedades de resistencia a la fatiga en el entorno vibratorio en el rango de los gigaciclos, y se puede formar una junta de soldadura que tiene un valor de tenacidad a la fractura δc , suficientemente alto, por lo cual la junta de soldadura ofrece una alta aplicabilidad industrial como parte de los cimientos como torre generadora de energía eólica en altamar.

25 **Lista de símbolos de referencia**

- 1 material de acero
- 2 ranura
- 30 3 metal de inserción
- 4 metal de soldadura
- 5 tensión de compresión
- 6 sección de soldadura
- 21 placa de acero
- 35 22 perlas de soldadura
- 23 pieza de ensayo de fatiga en juntas
- 24 pieza de ensayo de fatiga ultrasónica

REIVINDICACIONES

1. Una junta de soldadura (10), que comprende:
un par de materiales de acero (1); y
un metal de soldadura (4) formado por un haz de alta densidad energética en una sección de soldadura a tope (6) entre el par de materiales de acero (1),
donde el contenido de C en el par de materiales de acero se encuentra en el rango de 0,01 a 0,08 % en masa,
donde la temperatura de inicio de la transformación Ms, que se calcula mediante la siguiente fórmula (a) empleando una composición en % en masa del metal de soldadura (4) es de 250 °C o inferior, de modo que el metal de soldadura (4) se transforma en martensita en un estado en el que no está en contacto con el material de acero (1),
donde se imparte una tensión residual de compresión (5) en la sección de la soldadura a tope (6), debido a la transformación del metal de soldadura (4) en martensita,
donde el espesor del material de acero (1) es de 30 mm a 200 mm,
donde el haz de alta densidad energética es un haz de electrones; y
donde la tensión de tracción del par de materiales de acero (1) es 690 MPa o inferior
- $$Ms(^{\circ}C) = 371 - 353C - 22Si - 24,3Mn - 7,7Cu - 17,3Ni - 17,7Cr - 25,8Mo... \quad (a)$$
2. La junta de soldadura (10), de acuerdo con la reivindicación 1, donde el metal de soldadura (4) contiene 0,5 a 4,0 % en masa de Ni y de 0,5 a 6,0 % en masa de Cr.
3. La junta de soldadura (10), de acuerdo con la reivindicación 2, donde el metal de soldadura (4) contiene uno o dos de 0,1 a 2,0 % en masa de Mo y 0,1 a 5,0 % en masa de Cu, y contiene Ni, Cr, Mo, y Cu en una cantidad de 1,1 a 10,0 % en masa en total.
4. La junta de soldadura (10), de acuerdo con la reivindicación 1, donde el metal de soldadura (4) contiene 4,0 a 6,0 % en masa de Ni.
5. La junta de soldadura (10), de acuerdo con la reivindicación 4, donde el metal de soldadura (4) contiene uno o dos o más de 0,1 a 6,0 % en masa de Cr; 0,1 a 2,0 % en masa de Mo, y 0,1 a 5,0 % en masa de Cu; y contiene Ni, Cr, Mo, y Cu en una cantidad de 4,1 a 10,0 % en masa en total.
6. La junta de soldadura (10), de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, donde el material de acero (1) contiene 0,05 a 0,80 % en masa de Si; 0,8 a 2,5 % en masa de Mn; $\leq 0,03$ % en masa de P; $\leq 0,02$ % en masa de S; $\leq 0,008$ % en masa de Al; 0,005 a 0,030 % en masa de Ti; y un balance que consiste en hierro e impurezas inevitables.
7. La junta de soldadura (10), de acuerdo con la reivindicación 6, donde el material de acero (1) contiene uno o dos o más de 0,1 a 1,0 % en masa de Cu; 0,1 a 6,0 % en masa de Ni; 0,1 a 1,0 % en masa de Cr; 0,1 a 0,5 % en masa de Mo; 0,01 a 0,08 % en masa de Nb; 0,01 a 0,10 % en masa de V; y 0,0005 a 0,0050 % en masa de B.

35

FIG. 1A

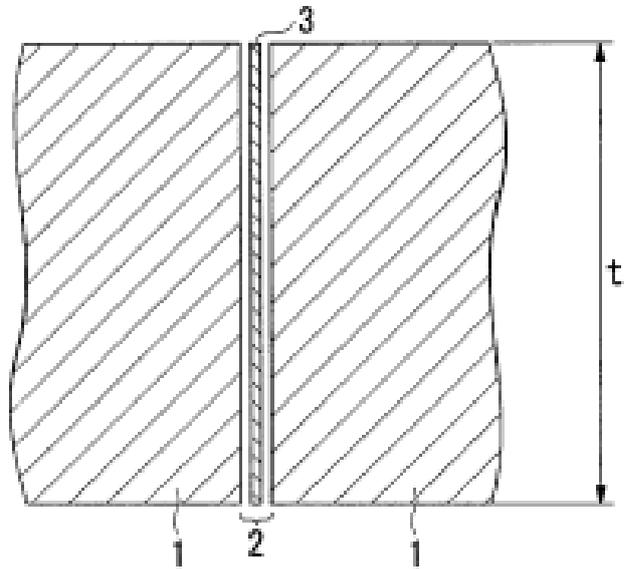


FIG. 1B

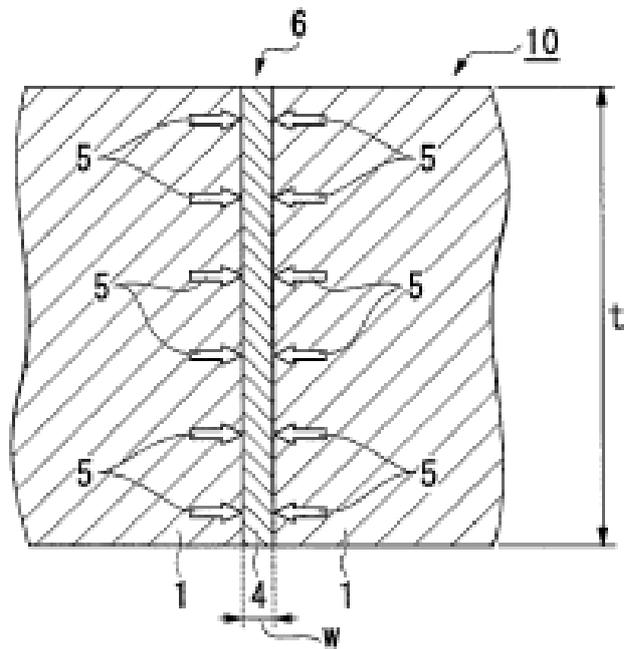


FIG. 2

